



## Result Page

Notice: This translation is produced by an automated process; it is intended only to make the technical content of the original document sufficiently clear in the target language. This service is not a replacement for professional translation services. The esp@cenet® Terms and Conditions of use are also applicable to the use of the translation tool and the results derived therefrom.

The invention relates to a method to the generation of ultrakurzer laser light pulses, in particular a method to the stabilization of the operation of a pulse laser and a method to the generation of highly exact optical frequencies, and a laser device to the generation of ultrakurzer light pulses, in particular a frequency-stabilized pulse laser.

The generation of ultrakurzer laser light pulses (light pulses with characteristic pulse durations in the LV to teleprinter region), known since the 70's years, based on the so-called. Fashion synchronisation. In a laser medium a great many natural oscillations with various frequencies can become excited with sufficient bandwidth of the laser transition in the resonator. In such a way becomes by a suitable mechanism between the natural oscillations a fixed phase relationship set (fashion synchronisation) comes it to the radiation of short light pulses with a temporal distance rope, which the same quotient from double resonator length and rotational speed of the pulses is, and a spectral composition the corresponding optical frequencies contributing lively in the resonator to the pulse formation.

In the case of Fourier transformation of the field process of the pulse-type laser radiation of the time into the frequency area results a so called frequency comb, which by delta - similar functions with the optical frequencies formed contributing to each pulse becomes and whose envelope within the bandwidth of the laser transition in the laser medium lies. The width of the envelopes is essentially reverse proportional to the pulse duration. Each frequency contribution to a such frequency comb becomes here as frequency component or mode M referred. The frequency spacing of the elements of the frequency comb is the corresponding (longitudinal) laser fashions integral multiple of the repetition frequency  $f_r = \text{rope} \cdot \langle -1 \rangle$  (Repetition rate) of the laser pulses. The comb structure of teleprinter-pulsed in the frequency area becomes for example in "Femtosecond laser of pulse" (Hrsg. C. Rullière, Springer publishing house, Berlin 1998) described.

Since the pulse repetition frequency depends  $f_r$  on the resonator length, displacements arise ideal-prove fixed mode spacings with smallest instabilities of the resonator. There is techniques to the stabilization of the resonator length known, which suppress a change of the mode spacings. For this for example a resonator final mirror in resonator longitudinal direction movable disposed and during a fashion shift is placed behind using a control loop. This conventional stabilization does not meet however the current precision demands with applications in the spectroscopy or time measuring technique.

▲ top

Of J. N. Cornerstone et al. (see "Physical Review Letters", Bd. 40, 1978, S. 847 FF.) recognized became that the lining up of the modes as scale for a frequency calibration are suitable could. In addition, simultaneous ones one referred the insufficient stability of the pulse laser and to displacements of the fashion frequencies. It became found that these displacements continue to arise despite the stabilization of the resonator length. In accordance with L. Xu et al. in "Optics Letters", Bd. 21, 1996, S. 2008 FF., become this that the group velocity of a pulse, caused by the fact, which agrees the scan time in the resonator and with it the repetition frequency  $f_r$  certain, usually not with the phase velocity of the single modes. The frequency components separated by integral multiple of the repetition frequency  $f_r$  can be represented in their absolute Frequenzlage not by integral multiple (n) the repetition frequency  $f_r$ , but by the sum  $(n \cdot f_r + f_0)$  out n. Wiederholfrequenz  $f_r$  and a so called offset or phase slip frequency  $f_0$ , which is for all frequency components the same value of the corresponding quotient from the respective phase differences from pulse to pulse by the scan time (2) rope. A determination of these phase differences is not so far more available, so that the applications of pulse lasers for measuring purposes or as generators of optical frequencies are limited.

In the older German patent application DE 199 11 103 is techniques to the stabilized operation of pulse lasers described. With these provided is to accomplish beside the control of the repetition frequency also an adjustment of the offset frequency. For adjustment the offset frequency  $f_0$  a linear dispersion introduced becomes, those the frequency components December of laser pulses spectral specific affected into the optical path of the resonator arrangement of the pulse laser. The introduction of the linear dispersion made by a spectral specific effective change of the resonator length in a branch of resonator, which the light pulses go through after compensation of the group velocity dispersion spectral spatial separated, or by other mechanical (dumps of a transparent plate, insertion of a Prismenpaars or insertion of a wedge (z. B. 1 DEG - Wedge) into the optical path of the resonator arrangement) or electrooptical (adjustment of the effective pump power to pumps of the active medium of the pulse laser) measures. The adjustment of the repeating and of the offset frequency made in control loops, which are based on the

subsequent principle.

Or several frequency components of the pulse fashion spectrum become simultaneous directed with an optical reference frequency on a detector, in whose output a beat signal is contained of the corresponding deviation between the frequency components and the reference frequency. The beat signal becomes used as actuating signal the control of the repeating or offset frequency. The reference frequency becomes generated by a stabilized frequency generator.

In the older German patent application the DE of 199 11 103 described control loops for pulse laser stabilization possesses a relative complex structure by the provision of the reference generators. There is an interest to stabilize pulse lasers with a simplified structure without having to accept thereby limitations of the stabilization accuracy.

From the publication of J. N. Cornerstone, A. I. Ferguson and T. W. Hänsch in "Physical Review Letters", band 40, 1978, side 847 FF. a method is to the highly soluble 2-Photonen spectroscopy with HP-laser-pulsed known. The laser pulses go through a measuring cell with sodium steam in two opposite directions in such a manner that can become excited when meeting two light-pulsed a straight 2-Photonen-Übergang, whose total energy consists of two partial amounts, which correspond themselves straight two complementary frequency components in the fashion spectrum of the light pulses. This measuring technique a possible highly soluble spectroscopy, since the Doppler broadening of the observed junctions becomes avoided.

From the publication of S. N. Bagayev et al. in "Appl. Physical one. B ", band 70, 2000, side 375 FF is the operation of a fashion-coupled titanium sapphire laser known, whereby a laser stabilization is provided using control loops. The patent application EP 1,014,518 a2 describes a laser oscillator, which becomes likewise stabilized with control loops.

It is the object of the invention to indicate an improved method to the generation of stabilized laser light pulses which is convertible with a simplified machine structure. The object of the invention is it also to make an improved laser device available which is designed to the generation of stabilized laser pulses and a simple, a compact and maintenance-poor structure possesses.

These objects become by a method and a laser device with the features in accordance with the requirements for godfather 1 and/or. 12 dissolved. Favourable embodiments of the invention result from the dependent claims.

Starting point of the invention is the operation of a pulse laser with two control loops the corresponding two degrees of freedom repetition frequency and offset frequency of the fashion spectrum. In a repetition frequency control loop a first actuating signal becomes for adjustment the repetition frequency generated. Corresponding one serves an offset frequency control loop for the generation of a second actuating signal for adjustment the offset frequency. Is according to invention provided that into from both control loops the actuating signal from the output of a detector mechanism derived becomes at least, with which a spectroscopic signal (preferably the fluorescence radiation) from a reference cell is more detectable. In the reference cell a narrow-band atomic junction becomes optical excited and the spectroscopic signal induced with pulses of the pulse laser, if the laser pulses possess a pre-determined repetition frequency and a pre-determined offset frequency. If deviations of the predetermined values arise, no spectroscopic signal becomes induced. The output of the detector mechanism is thereby for the occurrence or absence of the spectroscopic signal and thus for the adjustment of the repeating and offset frequencies characteristic. That different control loop becomes formed by comparison of a frequency component of the laser pulses with an optical reference frequency, which glides from an other frequency component of the laser pulses is, or a frequency spacing of frequency components of the laser pulses with a microwave reference frequency and a derivative of a corresponding actuating signal in each case.

▲ top

As spectroscopic signal for example a fluorescence signal, an absorption signal, becomes photo ionization signal (with a photoelectron detector detected), or opto a galvanic or opto acoustic signal processed.

The stabilization technology according to invention possesses the advantage opposite the conventional techniques that must be provided to the stabilization of the pulse laser no separate reference lasers. The structure stabilized of the according to invention laser device becomes significant simplified thereby. It becomes an integration into a compact, transportable laser system possible, which possesses new applications in the spectroscopy, time measuring technique and telecommunication.

Subject-matter of the invention is also a laser device to the generation of ultrakurzer laser light pulses, which is provided with the repetition frequency and offset frequency control loops. The corresponding explained above principles is at least one of the control loops with the reference cell provided and for adjustment the repetition frequency or the offset frequency in dependence of the detection of the spectroscopic signal of the reference cell arranged.

In accordance with a preferred performance form of the invention a made widening of the laser light pulses by self phase modulation, preferably with an optical fiber, in such a manner that the fashion spectrum of the laser pulses spans a Frequenzoktave, in which a low frequency component  $f_n$  and a higher-frequency component the corresponding double value  $2f_n$  it is contained. In this case made in the respective control loop a phase coupling between a low-frequency frequency component and an frequency-halved, higher-frequency frequency component of

the fashion spectrum (or reverse).

In accordance with an other preferable embodiment of the invention the reference cell becomes by a reference vapor cell formed, those the optical excitation without Doppler broadening of the optical junctions designed is (2-Photonen-Spektroskopie, polarization spectroscopy, saturation spectroscopy). This possesses the advantage that the fluorescence can become extreme narrow-band excited, so that given by the detection of the occurrence or absence of the fluorescence a sensitive means is to the monitoring of the repeating and/or offset frequencies.

Other advantages and details of the invention become from the description of the accompanying designs apparent. Show:

Fig. 1 a schematic summary presentation of a laser device in accordance with a first embodiment of the invention, and

Fig. 2 a schematic summary presentation of a laser device in accordance with an other embodiment of the invention.

The invention becomes in the following described with reference to a laser device with two control loops, as repetition frequency and/or. Offset frequency control loops referred become. The invention is not on the here explained function the corresponding respective designation limited, but can also by control of the offset frequency with the repetition frequency control loop and reverse be implemented. Critical one is only that are provided for the two degrees of freedom of the frequency components of the laser pulses two control loops. The principle of the adjustment of the repeating and offset frequencies with control loops in dependence of beat signals from a frequency component and a reference frequency is actual in the older German patent application DE 199 11 103 or bspw. in the publication of T. Udem et al. in "Physical Review Letters", band 82, 1999, side 3568 FF. described. With details for the structure of the control loops therefore one does not deal here.

With in the following the explained embodiments is in each case one of the control loops with the Referenzelle and the other control loop to the balanced one of frequency components relative to the reference frequency designed. In accordance with an other (not represented) embodiment also both control loops with separated reference cells, which are designed to the excitation of various optical junctions, can become reacted.

In Fig. 1 is the laser device 100 to the generation of stabilized laser-pulsed P with the pulse laser 10, the repetition frequency control loop 30 and the offset control loop 20 shown. The pulse laser 10 becomes bspw. by a titanium sapphire laser (z. B. "Coherent Mira 900", pulse-prolonged 73 telex, repetition frequency  $f_r = 75$  MHz), a corresponding ring laser,  $f_r = 1$  GHz, or a diode-pumped solid state laser (z. B. Chrome left-SAF-laser) formed. The pulse laser 10 is preferably a compact and a transportable, if necessary. battery powered, apparatus.

The pulse laser 10 is optional with a mechanism to the widening of the laser pulses by self phase modulation (dashed shown, reference numeral 11) connected. The mechanism 11 for pulse widening is z. B. an optical single mode fiber. The self phase modulation becomes from K. Imai in "IEEE Journal OF quantum Electronics" band 34, 1998, side 54 FF. described. A particularly strong widening of the fashion comb of achieved one optical fibers structured with use, which possess a fiber core and around this axial longitudinal thin air passages (see D. Mogilevtsev et al. in "optics Letters", band 23, 1998, side 1662 FF., T. A. Birks in "optics Letters", band 22, 1997, side 961 FF. or T. A. Birks in "IEEE Photonics Technology Letters", band 11, 1999, side 674 FF.).

Of the pulse laser the 10, if necessary. the self phase modulation 11 submitted, laser pulses A become in the offset frequency control loop 20 with the beam splitters and/or. Deflecting mirrors 22 to 25 into various spectral portions B, C divided. For this at least one is the mirror 22, 25 to the spectral selective deflection of radiation portions of the light pulses A designed. For example is provided that the portion of B contains higher-frequency frequency components of the fashion spectrum and the portion of C low frequency components of the fashion spectrum. The provision of a sufficient strong beat signal at the detector mechanism 21 the frequencies of the portions of B and C with a frequency multiplier become or - divisor 26 together matched. With the example mentioned (C: low-frequency portion) is the component 26 a frequency multiplier. The component 26 is a multiplier or a partial stage for optical frequencies, as it is actual known from the state of the art.

Particularly a simple structure results, if in the fashion spectrum of the laser pulses a whole Frequenzoktave is spanned. In this case the component 26 is an optical nonlinear crystal for frequency duplication (or - halving). After pass of the Frequenzvervielfachung (component 26) a frequency-shifted radiation portion of D is present. The radiation portions of B and D become simultaneous 21 directed on the detector mechanism. With simultaneous incident of the radiation portions the corresponding frequency deviation of the frequency component (n) of the radiation portions of B, D becomes an electrical output generated at the detector mechanism 21, which contains frequency portions with a certain beat frequency. The output becomes 27 given to the first variable gain amplifier, 10 operated with which (actual known) a mechanism becomes for adjustment the offset frequency of the pulse laser. This (not represented) mechanism becomes so operated that the beat signal becomes zero or possesses a pre-determined reference frequency. The mechanism for adjustment the offset frequency can by the o. g. Measures realized becomes, which are in the German patent application DE 199 11 103 described.

In accordance with a modified embodiment also the portion of B can contain low-frequency frequency components

and the portion of C higher-frequency frequency components, whereby the component is 26 then designed to the frequency division. Alternative one can be also the mechanism for Frequenzvervielfachung or - division in in each case different the branch of the beam splitter 22 to 25 provided. In accordance with an other modification the mirrors 22 to 25 know same-acting beam splitters (z also by others. B. Prisms) replaced become. Additional ones can in the represented optical path of the portions B, C and D optical filter and if necessary, a time delay distance to the matching of the temporal flow of the radiation portions during the detector mechanism 21 provided its.

The detector mechanism 21 is a photosensitive member, like z. B. a photodiode or a photomultiplier. The detector mechanism can other mechanisms to the signal figuration downstream be. A signal figuration can bspw. a filtration of the outputs and/or a gain cover.

An other radiation portion of E that, if necessary, phasemodulated, laser pulses becomes the repetition frequency control loop 30 transmitted. At the beam splitter 32 the radiation portion of G, which corresponds to the spectral composition of the laser pulses, becomes on the one hand 33 directed as sequence of stabilized output pulses P provided and on the other hand on the reference cell.

When reference cell 33 is general each cell or specimen chamber more usable, which contains a substance, which shows a spectroscopic signal corresponding with optical excitation at least a frequency component of the radiation portion of G. The excitation spectrum can point an extreme narrow-bandness to the achievement of desired rule stability. Therefore the reference cell 33 is preferably implemented in the illustrated embodiment as reference vapor cell, those to the doppler-free optical excitation (z. B. 2-Photonen-Spektroskopie, polarization spectroscopy, saturation spectroscopy) designed is.

The reference vapor cell 33 is a keep at a moderate temperaturable steam cell, those with operation the vapor of a suitable fluorescent substance (z. B. Iodine, rubidium, sodium or such a thing) contain. As a result of adjustment of the cell temperature a defined vapor pressure in the reference cell, which specifies the layer and width of the atomic junctions, arises. The radiation portion of G of the laser pulses passes through in a first reference direction (arrow direction) the reference vapor cell, and meets on the back a plane mirror 34, the depressing pulses in opposite direction (double arrow) the backreflected. The distance of the mirror 34 of the center of the reference vapor cell 33 is so set that the laser pulses in the cell constructive overlay. As of J. N. Cornerstone et al. (see above) described, supply themselves the complementary frequency components in the fashion spectrum of the laser pulses of the straight energy contributions z. B. to the optical 2-Photonen excitation. Only the steam atoms or molecules excited, which do not move regarding the propagation direction of the laser pulses, become. Thus a Doppler broadening becomes avoided. The fluorescence lively in the vapor becomes 31 directed as spectroscopic signal on the detector mechanism.

At the detector mechanism 31 an output becomes the corresponding fluorescence of the reference vapor cell 33 generated and as electrical output, if necessary, filtered and/or between-amplified, to the variable gain amplifier 35 given, 10 operated with which a mechanism becomes for adjustment the repetition frequency in the pulse laser. This (not represented) mechanism covers bspw. a mechanism to the change of the resonator length of the pulse laser 10. With a gain of the resonator length corresponding changes also the repetition frequency. The repetition frequency of the pulse laser 10 becomes adjusted until becomes 33 detected with the detector mechanism 31 a fluorescence signal of the reference vapor cell.

▲ top

In place of the closed reference vapor cell 33 also an open cell with an atomic beam can become as system the narrow-band optical excitation used.

In Fig. 2 is a modified embodiment of a laser device according to invention illustrated, which contains again an offset frequency control loop 50 and a repetition frequency control loop 40. The offset frequency control loop 50 functions to analogue to the explained above repetition frequency control loop 30, whereby with the output of the detector mechanism 51 and the variable gain amplifier 55 the offset frequency of the pulse laser becomes 10 depending upon being present that here absence of the fluorescence of the cell 53 controlled.

The repetition frequency control loop 40 based on the phase coupling of a frequency spacing from the fashion spectrum of the laser pulses with a reference frequency in the radio frequency range, supplied by a microwave generator. A radiation portion of B in the repetition frequency control loop 40 is uncoupled by laser-pulsed A and on the detector mechanism 42 directed. The output C of the detector mechanism 42 is a radio composite signal with frequency portions of corresponding frequency spacing arising in the fashion spectrum of the laser pulses. The output C becomes 43 given to an electrical mixer mechanism, which receives the simultaneous microwave reference frequency from the microwave generator 44. A beat signal, which becomes 10 used as actuating signal over the variable gain amplifier 45 for adjustment the repetition frequency of the pulse laser, supplies the additives superposition of both signals.

The laser device according to invention is more insertable with advantage in the telecommunication, spectroscopy and time measuring technique analogue to the applications, which are in the older German patent application DE 199 11 103 described.



## Result Page

Notice: This translation is produced by an automated process; it is intended only to make the technical content of the original document sufficiently clear in the target language. This service is not a replacement for professional translation services. The esp@cenet® Terms and Conditions of use are also applicable to the use of the translation tool and the results derived therefrom.

1. Method to the operation of a pulse laser (10), which to the generation of laser-pulsed with a repetition frequency  $f_R$  arranged is, the one spectrum from  $N$  frequency components  $f_n$  with  $f_n = n \cdot f_R + f_0$  ( $n = 1, \dots, N$ ) contained, whereby  $f_0$  represents an offset frequency, with which with a repetition frequency control loop a first actuating signal becomes for adjustment the repetition frequency and with an offset frequency control loop a second actuating signal for adjustment the offset frequency generated, characterised in that the laser pulses on a reference cell (33, 53) directed become, in which with adjustment of a pre-determined repetition frequency and a pre-determined offset frequency an atomic junction can become optical excited and a spectroscopic signal induced, that with a first detector mechanism (31, 51) are more detectable, becomes generated with which an output characteristic for the occurrence or absence of the spectroscopic signal, the output of the first detector mechanism (31, 51) the generation either first or the second actuating signal used becomes, and the repetition frequency or the offset frequency of the pulse laser (10) so set becomes that the output indicates the occurrence of the spectroscopic signal to the first detector mechanism (31, 51).
2. Method according to claim 1, with that the output of the first detector mechanism (31, 51) to the generation of the first actuating signal in the repetition frequency control loop used is opt and in the offset frequency control loop the generation second actuating signal for adjustment the offset frequency in dependence by the deviation of a first frequency component  $f_{n, 1}$  of the laser pulses by an optical reference frequency  $f_{ref, opt}$  or in dependence of the deviation of a distance of frequency components  $f_{n, 1}$ ,  $f_{n, 2}$  of the laser pulses of a microwave reference frequency  $f_{ref, rf}$  made.
3. Verfahren gemäss Anspruch 1, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) zur Erzeugung des zweiten Stellsignals im Offsetfrequenz-Regelkreis verwendet wird und im Wiederholfrequenz-Regelkreis die Erzeugung des ersten Stellsignals zur Einstellung der Wiederholfrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung einer ersten Frequenzkomponente  $f_{n,1}$  der Laserpulse von einer optischen Referenzfrequenz  $f_{ref,opt}$  oder in Abhängigkeit von der Abweichung eines Abstandes von Frequenzkomponenten  $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$  der Laserpulse von einer Mikrowellen-Referenzfrequenz  $f_{ref,rf}$  erfolgt.
4. Methods according to claim 2 or 3, with to the generation of the first or second actuating signal in dependence of the deviation of a first frequency component  $f_{n, 1}$  of the laser pulses of an optical reference frequency other frequency components  $f_{n, 3}$  of the laser pulses to the matching to the first frequency component  $f_{n, 1}$  of a Frequenzvervielfachung or - division submitted and simultaneous with the first frequency component on a second detector mechanism (21) directed becomes, whose output becomes corresponding used as the first or second actuating signal.
5. Methods according to claim 2 or 3, during to the generation of the first or second actuating signal in dependence of the deviation of a distance of frequency components  $f_{n, 1}$ ,  $f_{n, 2}$  of the laser pulses of a microwave reference frequency  $f_{ref, rf}$  the laser pulses on a third detector mechanism (42) directed will, their output a beat frequency the corresponding distance of the frequency components  $f_{n, 1}$ ,  $f_{n, 2}$  contains, and the output the third detector mechanism (42) at a mixing device (43) with the microwave reference frequency  $f_{ref, rf}$  of a microwave generator (44) mixed becomes, whereby the mixed signal of the mixing device (43) becomes corresponding used as the first or second actuating signal.
6. Method in accordance with one of the preceding claims, with that a widening of the spectrum of the frequency components of the light pulses by self phase modulation made.
7. Method according to claim 6, becomes generated with which the self phase modulation, as the laser pulses go through an optical fiber (11).
8. Method in accordance with one of the preceding claims 2 to 7, with which to the generation of the optical reference frequency the laser pulses of a frequency doubling are submitted or - halving.

9. Method in accordance with one of the preceding claims, with which as reference cell a keep at a moderate temperaturable reference becomes steam cell (33, 53) or a cell with a free atomic beam used.
10. Method according to claim 9, with in the reference steam cell (33) a doppler-free excitation made, which becomes by two opposite in each case laser pulses triggered current by the reference steam cell (33).
11. Method in accordance with one of the preceding claims, with which as spectroscopic signal a fluorescence emission, a change of absorption, a photo ionization signal or galvano or acoustooptical signal an induced become.
12. Laser device to the generation of laser-pulsed with a repetition frequency  $f_R$ , the one spectrum from  $N$  frequency components  $f_n$  with  $f_n = n \cdot f_R + f_0$  ( $n = 1, \dots, N$ ) contain, whereby  $f_0$  represents an offset frequency, with a pulse laser (10), a repetition frequency control loop for adjustment the repetition frequency of the pulse laser (10) and an offset frequency control loop for adjustment the offset frequency, characterised in that a reference cell (33, 53) and a first detector mechanism (31, 51) provided are, whereby in the reference cell (33, 53) with adjustment of a pre-determined repetition frequency and a pre-determined offset frequency with the laser-pulsed an atomic junction can become optical excited and a spectroscopic signal induced, that with the first detector mechanism (31, 51) are more detectable, which is arranged to produce an output characteristic for the occurrence or absence of the spectroscopic signal, the output of the first detector mechanism (31, 51) either first or the second actuating signal corresponding either in the repetition frequency control loop or in the offset frequency control loop forms, and a mechanism for adjustment the repetition frequency or the offset frequency of the pulse laser (10) provided is, with which the repetition frequency or the offset frequency is so more adjustable that the output indicates the occurrence of the spectroscopic signal to the first detector mechanism (31, 51).
13. Laser device according to claim 12, with that the output of the first detector mechanism (31, 51) the first actuating signal in the repetition frequency control loop forms and in the offset frequency control loop a beam splitter arrangement (22-25), a frequency multiplier or - divisor mechanism (26), a second detector mechanism (21) and a variable gain amplifier (27) provided are, which are connected with a mechanism for adjustment the offset frequency of the pulse laser (10), whereby the offset frequency control loop (20) to the generation second actuating signal for adjustment the offset frequency in dependence of the deviation of a first frequency component  $f_n$ , 1 of the laser pulses of one with the beam splitter arrangement (22-25) and the frequency multiplier or - a divisor mechanism (26) for generated optical reference frequency  $f_{ref, opt}$  arranged is.
14. Laser device according to claim 12, with that the output of the first detector mechanism (31, 51) the first actuating signal in the repetition frequency control loop forms and in the offset frequency control loop a third detector mechanism (42) to the generation of an output with a beat frequency the corresponding distance of the frequency components  $f_n$ , for 1,  $f_n$ , 2, a mixer mechanism (43) to the mixture of the microwave reference frequency supplied from a microwave generator (44)  $f_{ref}$ ,  $r_f$  and a variable gain amplifier (27) provided is, which is connected with a mechanism for adjustment the offset frequency of the pulse laser (10), whereby the offset frequency control loop (20) to the generation second actuating signal for adjustment the offset frequency in dependence of the deviation of the distance of the frequency components  $f_n$ , 1,  $f_n$ , 2 of the microwave reference frequency  $f_{ref}$ ,  $r_f$  arranged is.
15. Laser device according to claim 12, with that the output of the first detector mechanism (31, 51) the second actuating signal in the offset frequency control loop forms and in the repetition frequency control loop a beam splitter arrangement (22-25), a frequency multiplier or - divisor mechanism (26), a second detector mechanism (21) and a variable gain amplifier (27) provided are, which are connected with a mechanism for adjustment the repetition frequency of the pulse laser (10), whereby the repetition frequency control loop (20) to the generation of the first actuating signal for adjustment the repetition frequency in dependence of the deviation of a first frequency component  $f_n$ , 1 of the laser pulses of one with the beam splitter arrangement (22-25) and the frequency multiplier or - a divisor mechanism (26) for generated optical reference frequency  $f_{ref, opt}$  arranged is.
16. Laser device according to claim 12, with that the output of the first detector mechanism (31, 51) the second actuating signal in the offset frequency control loop forms and in the repetition frequency control loop a third detector mechanism (42) to the generation of an output with a beat frequency the corresponding distance of the frequency components  $f_n$ , for 1,  $f_n$ , 2, a mixer mechanism (43) to the mixture of the microwave reference frequency supplied from a microwave generator (44)  $f_{ref}$ ,  $r_f$  and a variable gain amplifier (27) provided is, which is connected with a mechanism for adjustment the repetition frequency of the pulse laser (10), whereby the repetition frequency control loop (20) to the generation of the first actuating signal for adjustment the repetition frequency in dependence of the deviation of the distance of the frequency components  $f_n$ , 1,  $f_n$ , 2 of the microwave reference frequency  $f_{ref}$ ,  $r_f$  arranged is.
17. Laser device in accordance with one of the claims 12 to 16, provided with which a mechanism (11) is for the self phase modulation of the laser pulses.
18. Laser device according to claim 17, formed with which the mechanism becomes the self phase modulation by an optical fiber (11).
19. Laser device in accordance with one of the claims 12 to 18, with which the reference cell is a reference vapor cell

, (33), which is designed to the doppler-free excitation.

20. Laser device in accordance with one of the claims 12 to 19, with which the reference cell is a reference vapor cell (33), which is designed to the excitation of the spectroscopic signal as fluorescence emission signal, signal of change of absorption, photo ionization signal or galvano or acoustooptical signal.

**Title:** **DE10044404A1: Verfahren und Vorrichtung zur Erzeugung von stabilisierten ultrakurzen Laser-Lichtpulsen**

**Derwent Title:** Method and device for generating stabilized ultra-short laser light pulses, uses a pulse laser to generate laser pulses with a recurrence frequency and a spectrum of N frequency components [[Derwent Record](#)]

**Country:** DE Germany  
**Kind:** A1 Document Laid open (First Publication) <sup>1</sup> (See also: [DE10044404C2](#) )

**Inventor:** Holzwarth, Ronald, Dr.; Backnang, Germany 71522  
 Udem, Thomas, Dr.; München, Germany 80331  
 Hänsch, Theodor, Prof. Dr.; München, Germany 80333

**Assignee:** Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V., München, Germany80539  
[News, Profiles, Stocks and More about this company](#)

**Published / Filed:** 2002-04-04 / 2000-09-08

**Application Number:** DE2000010044404

**IPC Code:** Advanced: [H01S 3/13](#); [H01S 3/102](#); [H01S 3/139](#); [H01S 5/0683](#);  
 Core: [H01S 5/00](#); more...  
 IPC-7: [H01S 3/131](#);

**ECLA Code:** H01S3/13;

**Priority Number:** 2000-09-08 DE2000010044404

**Abstract:** Zum Betrieb eines Pulsasers (10), der zur Erzeugung von Laserpulsen mit einer Wiederholfrequenz ( $f_R$ ) eingerichtet ist, die ein Spektrum aus N Frequenzkomponenten  $f_n$  mit  $f_n = n \cdot f_R + f_0$  ( $n = 1 - N$ ) enthalten ( $f_0$ : Offsetfrequenz), bei dem mit einem Wiederholfrequenz-Regelkreis ein erstes Stellsignal zur Wiederholfrequenzeinstellung und mit einem Offsetfrequenz-Regelkreis ein zweites Stellsignal zur Offsetfrequenzeinstellung erzeugt wird, werden die Laserpulse auf eine Referenzzelle (33) gerichtet, in der bei einer vorbestimmten Wiederholfrequenz und einer vorbestimmten Offsetfrequenz ein atomarer Übergang angeregt und ein spektroskopisches Signal induziert werden kann, das mit einer Detektoreinrichtung (31) erfassbar ist, mit der ein für das Auftreten oder Fehlen des spektroskopischen Signals charakteristisches Ausgangssignal erzeugt wird, das Ausgangssignal der Detektoreinrichtung (31) zur Erzeugung entweder des ersten oder des zweiten Stellsignals verwendet und die Wiederholfrequenz oder die Offsetfrequenz des Pulsasers (10) so eingestellt wird, dass das Ausgangssignal der Detektoreinrichtung (31) das Auftreten des spektroskopischen Signals anzeigt.

**Attorney, Agent or Firm:** v. Bezold & Sozien ; , München 80799



INPADOC

Show legal status actions

Get Now: [Family Legal Status Report](#)

Legal Status:

Designated Country:

AE AG AL AM AP AT AU AZ BA BB BG BR BY BZ CA CH CN CO CR CU CZ DK DM  
DZ EA EC EE EP ES FI GB GD GE GH GM HR HU ID IL IN

Family:

Show 5 known family members

Claims:

[Hide claims](#)

1. Verfahren zum Betrieb eines Pulsasers (10), der zur Erzeugung von Laserpulsen mit einer Wiederholfrequenz (fR) eingerichtet ist, die ein Spektrum aus N

Frequenzkomponenten  $f_n$  mit  $f_n = n \cdot f_R + f_0$  ( $n = 1, \dots, N$ ) enthalten, wobei ( $f_0$ )

eine Offsetfrequenz darstellt, bei dem mit einem Wiederholfrequenz-Regelkreis ein erstes Stellsignal zur Einstellung der Wiederholfrequenz und mit einem Offsetfrequenz-Regelkreis ein zweites Stellsignal zur Einstellung der Offsetfrequenz erzeugt wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Laserpulse auf eine Referenzzelle (33, 53) gerichtet werden, in der bei Einstellung einer vorbestimmten Wiederholfrequenz und einer vorbestimmten Offsetfrequenz ein atomarer Übergang optisch angeregt und ein spektroskopisches Signal induziert werden kann, das mit einer ersten Detektoreinrichtung (31, 51) erfassbar ist, mit der ein für das Auftreten oder Fehlen des spektroskopischen Signals charakteristisches Ausgangssignal erzeugt wird,

das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) zur Erzeugung entweder des ersten oder des zweiten Stellsignals verwendet wird, und die Wiederholfrequenz oder die Offsetfrequenz des Pulsasers (10) so eingestellt werden, dass das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) das Auftreten des spektroskopischen Signals anzeigt.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) zur Erzeugung des ersten Stellsignals im Wiederholfrequenz-Regelkreis verwendet wird und im Offsetfrequenz-Regelkreis die Erzeugung des zweiten Stellsignals zur Einstellung der Offsetfrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung einer ersten Frequenzkomponente ( $f_{n,1}$ ) der Laserpulse von einer optischen Referenzfrequenz ( $f_{ref,opt}$ ) oder in Abhängigkeit von der Abweichung eines Abstandes von Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$ ) der Laserpulse von einer Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{ref,rf}$ ) erfolgt.

3. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) zur Erzeugung des zweiten Stellsignals im Offsetfrequenz-Regelkreis verwendet wird und im Wiederholfrequenz-Regelkreis die Erzeugung des ersten Stellsignals zur Einstellung der Wiederholfrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung einer ersten Frequenzkomponente ( $f_{n,1}$ ) der Laserpulse von einer optischen Referenzfrequenz ( $f_{ref,opt}$ ) oder in Abhängigkeit von der Abweichung eines Abstandes von Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$ ) der Laserpulse von einer Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{ref,rf}$ ) erfolgt.

4. Verfahren gemäß Anspruch 2 oder 3, bei dem zur Erzeugung des ersten oder zweiten Stellsignals in Abhängigkeit von der Abweichung einer ersten Frequenzkomponente ( $f_{n,1}$ ) der Laserpulse von einer optischen Referenzfrequenz eine weitere Frequenzkomponente ( $f_{n,3}$ ) der Laserpulse zur Anpassung an die erste Frequenzkomponente ( $f_{n,1}$ ) einer Frequenzvervielfachung oder -teilung unterzogen und gleichzeitig mit der

ersten Frequenzkomponente auf eine zweite Detektoreinrichtung (21) gerichtet wird, deren Ausgangssignal entsprechend als erstes oder zweites Stellsignal verwendet wird.

5. Verfahren gemäß Anspruch 2 oder 3, bei dem zur Erzeugung des ersten oder zweiten Stellsignals in Abhängigkeit von der Abweichung eines Abstandes von Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$ ) der Laserpulse von einer Mikrowellen- Referenzfrequenz ( $f_{\text{ref},\text{rf}}$ ) die Laserpulse auf eine dritte Detektoreinrichtung (42) gerichtet werden, deren Ausgangssignal eine Schwebungsfrequenz entsprechend dem Abstand der Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$ ) enthält, und das Ausgangssignal der dritten Detektoreinrichtung (42) an einer Mischeinrichtung (43) mit der Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{\text{ref},\text{rf}}$ ) von einem Mikrowellengenerator (44) gemischt wird, wobei das Mischsignal der Mischeinrichtung (43) entsprechend als erstes oder zweites Stellsignal verwendet wird.

6. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem eine Verbreiterung des Spektrums der Frequenzkomponenten der Lichtpulse durch Selbstphasenmodulation erfolgt.

7. Verfahren gemäß Anspruch 6, bei dem die Selbstphasenmodulation erzeugt wird, indem die Laserpulse eine optische Faser (11) durchlaufen.

8. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche 2 bis 7, bei dem zur Erzeugung der optischen Referenzfrequenz die Laserpulse einer Frequenzverdopplung oder -halbierung unterzogen werden.

9. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem als Referenzzelle eine temperierbare Referenz- Dampfzelle (33, 53) oder eine Zelle mit einem freien Atomstrahl verwendet wird.

10. Verfahren gemäß Anspruch 9, bei dem in der Referenz- Dampfzelle (36) eine dopplerfreie Anregung erfolgt, die jeweils durch zwei entgegengesetzt durch die Referenz- Dampfzelle (36) laufende Laserpulse ausgelöst wird.

11. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem als spektroskopisches Signal eine Fluoreszenzemission, eine Absorptionsänderung, ein Photoionisationssignal oder ein galvano- oder akusto-optisches Signal induziert wird.

12. Lasereinrichtung zur Erzeugung von Laserpulsen mit einer Wiederholfrequenz ( $f_R$ ), die ein Spektrum aus N Frequenzkomponenten ( $f_n$ )

mit  $f_n = n \cdot f_R + f_0$  ( $n = 1, \dots, N$ ) enthalten, wobei ( $f_0$ ) eine Offsetfrequenz

darstellt, mit einem Puls laser (10), einem Wiederholfrequenz-Regelkreis zur Einstellung der Wiederholfrequenz des Puls lasers (10) und einem Offsetfrequenz-Regelkreis zur Einstellung der Offsetfrequenz, dadurch gekennzeichnet, dass

eine Referenzzelle (33, 53) und eine erste Detektoreinrichtung (31, 51) vorgesehen sind, wobei in der Referenzzelle (33, 53) bei Einstellung einer vorbestimmten Wiederholfrequenz und einer Vorbestimmten Offsetfrequenz mit den Laserpulsen ein atomarer Übergang optisch angeregt und ein spektroskopisches Signal induziert werden kann, das mit der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) erfassbar ist, die dazu eingerichtet ist, ein für das Auftreten oder Fehlen des spektroskopischen Signals charakteristisches Ausgangssignal zu erzeugen, das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) entweder das erste oder das zweite Stellsignal entsprechend entweder im Wiederholfrequenz-Regelkreis oder im Offsetfrequenz-Regelkreis bildet, und eine Einrichtung zur Einstellung der Wiederholfrequenz oder der

Offsetfrequenz des Pulsasers (10) vorgesehen ist, mit der die Wiederholfrequenz oder die Offsetfrequenz so einstellbar sind, dass das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) das Auftreten des spektroskopischen Signals anzeigt.

13. Lasereinrichtung gemäß Anspruch 12, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) das erste Stellsignal im Wiederholfrequenz-Regelkreis bildet und im Offsetfrequenz-Regelkreis eine Strahlteileranordnung (22–25), eine Frequenzvervielfacher- oder -teilereinrichtung (26), eine zweite Detektoreinrichtung (21) und ein Regelverstärker (27) vorgesehen sind, der mit einer Einrichtung zur Einstellung der Offsetfrequenz des Pulsasers (10) verbunden ist, wobei der Offsetfrequenz-Regelkreis (20) zur Erzeugung des zweiten Stellsignal zur Einstellung der Offsetfrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung einer ersten Frequenzkomponente ( $f_{n,1}$ ) der Laserpulse von einer mit der Strahlteileranordnung (22–25) und der Frequenzvervielfacher- oder -teilereinrichtung (26) erzeugten optischen Referenzfrequenz ( $f_{\text{ref,opt}}$ ) eingerichtet ist.

14. Lasereinrichtung gemäß Anspruch 12, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) das erste Stellsignal im Wiederholfrequenz-Regelkreis bildet und im Offsetfrequenz-Regelkreis eine dritte Detektoreinrichtung (42) zur Erzeugung eines Ausgangssignals mit einer Schwebungsfrequenz entsprechend dem Abstand der Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$ ), eine Mischereinrichtung (43) zur Mischung der von einem Mikrowellengenerator (44) gelieferten Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{\text{ref,rf}}$ ) und ein Regelverstärker (27) vorgesehen sind, der mit einer Einrichtung zur Einstellung der Offsetfrequenz des Pulsasers (10) verbunden ist, wobei der Offsetfrequenz-Regelkreis (20) zur Erzeugung des zweiten Stellsignal zur Einstellung der Offsetfrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung vom Abstand der Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$ ) von der Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{\text{ref,rf}}$ ) eingerichtet ist.

15. Lasereinrichtung gemäß Anspruch 12, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) das zweite Stellsignal im Offsetfrequenz-Regelkreis bildet und im Wiederholfrequenz-Regelkreis eine Strahlteileranordnung (22–25), eine Frequenzvervielfacher- oder -teilereinrichtung (26), eine zweite Detektoreinrichtung (21) und ein Regelverstärker (27) vorgesehen sind, der mit einer Einrichtung zur Einstellung der Wiederholfrequenz des Pulsasers (10) verbunden ist, wobei der Wiederholfrequenz-Regelkreis (20) zur Erzeugung des ersten Stellsignals zur Einstellung der Wiederholfrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung einer ersten Frequenzkomponente ( $f_{n,1}$ ) der Laserpulse von einer mit der Strahlteileranordnung (22–25) und der Frequenzvervielfacher- oder -teilereinrichtung (26) erzeugten optischen Referenzfrequenz ( $f_{\text{ref,opt}}$ ) eingerichtet ist.

16. Lasereinrichtung gemäß Anspruch 12, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) das zweite Stellsignal im Offsetfrequenz-Regelkreis bildet und im Wiederholfrequenz-Regelkreis eine dritte Detektoreinrichtung (42) zur Erzeugung eines Ausgangssignals mit einer Schwebungsfrequenz entsprechend dem Abstand der Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$ ), eine Mischereinrichtung (43) zur Mischung der von einem Mikrowellengenerator (44) gelieferten Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{\text{ref,rf}}$ ) und ein Regelverstärker (27) vorgesehen sind, der mit einer Einrichtung zur Einstellung der Wiederholfrequenz des Pulsasers (10) verbunden ist, wobei der Wiederholfrequenz-Regelkreis (20) zur Erzeugung des ersten Stellsignals zur Einstellung der Wiederholfrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung vom Abstand der Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$ ) von der Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{\text{ref,rf}}$ ) eingerichtet ist.

17. Lasereinrichtung gemäß einem der Ansprüche 12 bis 16, bei der eine Einrichtung (11) zur Selbstphasenmodulation der Laserpulse vorgesehen ist.

18. Lasereinrichtung gemäß Anspruch 17, bei der die Einrichtung zur Selbstphasenmodulation durch eine optische Faser (11) gebildet wird.

19. Lasereinrichtung gemäß einem der Ansprüche 12 bis 18, bei der die Referenzzelle eine Referenz-Dampfzelle (36) ist, die zur dopplerfreien Anregung ausgelegt ist.

20. Lasereinrichtung gemäß einem der Ansprüche 12 bis 19, bei der die Referenzzelle eine Referenz-Dampfzelle (36) ist, die zur Anregung des spektroskopischen Signals als Fluoreszenzemission, Absorptionsänderung, Photoionisationssignal oder galvano- oder akusto-optisches Signal ausgelegt ist.

## Description

Expand description

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erzeugung ultrakurzer Laser-Lichtpulse, insbesondere ein Verfahren zur Stabilisierung des Betriebs eines Pulsasers und ein Verfahren zur Erzeugung hochgenauer optischer Frequenzen, und eine Lasereinrichtung zur Erzeugung ultrakurzer Lichtpulse, insbesondere einen frequenzstabilisierten Pulsaser.

## Domestic References:

PDF	Patent	Pub.Date	Inventor	Assignee	Title
<input checked="" type="checkbox"/>	DE19911103	2000-09-21	HAENSCH TH EO DO RW	Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.	Erzeugung stabilisierter, ultrakurzer Lichtpulse und deren Anwendung zur Synthese optischer Frequenzen

## Foreign References:

PDF	Publication	Date	IPC Code	Assignee	Title
<input checked="" type="checkbox"/>	US5029174		H01S 3/13	SPECTRA-PHYSICS, INC.	Intermodulation product stabilized laser
<input checked="" type="checkbox"/>	EP1014518A2		G04F 5/00	Nippon Telegraph and Telephone Corporation	An atomic frequency standard laser pulse oscillator

## Other References:

- BAGAYEV, S.N.; u.a.: A femtosecond self-modelocked Ti:sapphire laser with high stability of pulse-repetition and its applications. In: Appl.Phys. B, Vol. 70, 2000, S. 375-378 (4 pages) Cited by 6 patents [ISI abstract]

## Other Abstract Info:

None



21 Aktenzeichen: 100 44 404.0  
22 Anmeldetag: 8. 9. 2000  
43 Offenlegungstag: 4. 4. 2002

71 Anmelder:  
Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der  
Wissenschaften e.V., 80539 München, DE  
74 Vertreter:  
v. Bezold & Sozien, 80799 München

72 Erfinder:  
Holzwarth, Ronald, Dr., 71522 Backnang, DE; Udem,  
Thomas, Dr., 80331 München, DE; Hänsch,  
Theodor, Prof. Dr., 80333 München, DE

56 Entgegenhaltungen:

DE 199 11 103 A1  
US 50 29 174  
EP 10 14 518 A2

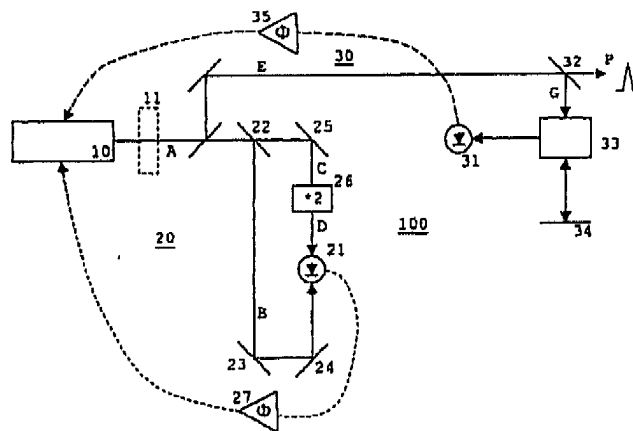
BAGAYEV, S.N.; u.a.: A femtosecond self-mode-  
locked Ti:sapphire laser with high stability of  
pulse-repetition and its applications. In:  
Appl. Phys. B, Vol. 70, 2000, S. 375-378;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

64 Verfahren und Vorrichtung zur Erzeugung von stabilisierten ultrakurzen Laser-Lichtpuls

67 Zum Betrieb eines PulsLasers (10), der zur Erzeugung von Laserpulsen mit einer Wiederholffrequenz ( $f_R$ ) eingerichtet ist, die ein Spektrum aus N Frequenzkomponenten  $f_n$  mit  $f_n = n \cdot f_R + f_0$  ( $n = 1 - N$ ) enthalten ( $f_0$ : Offsetfrequenz), bei dem mit einem Wiederholffrequenz-Regelkreis ein erstes Stellsignal zur Wiederholffrequenzeinstellung und mit einem Offsetfrequenz-Regelkreis ein zweites Stellsignal zur Offsetfrequenzeinstellung erzeugt wird, werden die Laserpulse auf eine Referenzzelle (33) gerichtet, in der bei einer vorbestimmten Wiederholffrequenz und einer vorbestimmten Offsetfrequenz ein atomarer Übergang angeregt und ein spektroskopisches Signal induziert werden kann, das mit einer Detektoreinrichtung (31) erfassbar ist, mit der ein für das Auftreten oder Fehlen des spektroskopischen Signals charakteristisches Ausgangssignal erzeugt wird, das Ausgangssignal der Detektoreinrichtung (31) zur Erzeugung entweder des ersten oder des zweiten Stellsignals verwendet und die Wiederholffrequenz oder die Offsetfrequenz des PulsLasers (10) so eingestellt wird, dass das Ausgangssignal der Detektoreinrichtung (31) das Auftreten des spektroskopischen Signals anzeigt.



[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erzeugung ultrakurzer Laser-Lichtpulse, insbesondere ein Verfahren zur Stabilisierung des Betriebs eines Pulsasers und ein Verfahren zur Erzeugung hochgenauer optischer Frequenzen, und eine Lasereinrichtung zur Erzeugung ultrakurzer Lichtpulse, insbesondere einen frequenzstabilisierten Pulsaser. [0002] Die seit den 70-er Jahren bekannte Erzeugung ultrakurzer Laser-Lichtpulse (Lichtpulse mit charakteristischen Pulsdauern im ns- bis fs-Bereich) basiert auf der sog. Modensynchronisation. In einem Lasermedium können bei genügender Bandbreite des Laserübergangs im Resonator sehr viele Eigenschwingungen mit verschiedenen Frequenzen angeregt werden. Wird durch einen geeigneten Mechanismus zwischen den Eigenschwingungen eine feste Phasenbeziehung eingestellt (Modensynchronisation) so kommt es zur Abstrahlung kurzer Lichtpulse mit einem zeitlichen Abstand  $\tau$ , der gleich dem Quotienten aus doppelter Resonatorlänge und Umlaufgeschwindigkeit der Pulse ist, und einer spektralen Zusammensetzung entsprechend den im Resonator angeregten, zur Pulsbildung beitragenden optischen Frequenzen.

[0003] Bei Fourier-Transformation des Feldverlaufs der pulsförmigen Laserstrahlung vom Zeit- in den Frequenzraum ergibt sich ein sogenannter Frequenzkamm, der durch  $\delta$ -ähnliche Funktionen bei den zu jedem Puls beitragenden optischen Frequenzen gebildet wird und dessen Einhüllende innerhalb der Bandbreite des Laserübergangs im Lasermedium liegt. Die Breite der Einhüllenden ist im wesentlichen umgekehrt proportional zur Pulsdauer. Jeder Frequenzbeitrag zu einem derartigen Frequenzkamm wird hier als Frequenzkomponente oder Mode M bezeichnet. Die Frequenzabstände der Elemente des Frequenzkammes sind entsprechend den (longitudinalen) Lasermoden ganzzahlige Vielfache der Wiederholfrequenz  $f_r = \tau^{-1}$  (Repetitionsrate) der Laserpulse. Die Kammstruktur von fs-Pulsen im Frequenzraum wird beispielsweise in "Femtosecond Laser Pulses" (Hrsg. C. Rullière, Springer-Verlag, Berlin 1998) beschrieben.

[0004] Da die Pulswiederholfrequenz  $f_r$  von der Resonatorlänge abhängt, treten bei geringsten Instabilitäten des Resonators Verschiebungen der idealerweise festen Modenabstände auf. Es sind Techniken zur Stabilisierung der Resonatorlänge bekannt, die eine Veränderung der Modenabstände unterdrücken. Hierzu wird beispielsweise ein Resonatorendspiegel in Resonatorlängsrichtung beweglich angeordnet und bei einer Modenverschiebung unter Verwendung eines Regelkreises nachgestellt. Diese herkömmliche Stabilisierung genügt jedoch nicht den aktuellen Genauigkeitsanforderungen bei Anwendungen in der Spektroskopie oder Zeitmeßtechnik.

[0005] Von J. N. Eckstein et al. (siehe "Physical Review Letters", Bd. 40, 1978, S. 847 ff.) wurde erkannt, dass sich die Aneinanderreihung der Moden als Skala für eine Frequenzkalibrierung eignen könnte. Gleichzeitig wurde aber auch auf die ungenügende Stabilität des Pulsasers und auf Verschiebungen der Modenfrequenzen hingewiesen. Es wurde festgestellt, dass diese Verschiebungen trotz der Stabilisierung der Resonatorlänge weiter auftreten. Gemäß L. Xu et al. in "Optics Letters", Bd. 21, 1996, S. 2008 ff., wird dies dadurch verursacht, dass die Gruppengeschwindigkeit eines Pulses, die die Umlaufzeit im Resonator und damit die Wiederholfrequenz  $f_r$  bestimmt, in der Regel nicht mit der Phasengeschwindigkeit der einzelnen Moden übereinstimmt. Die durch ganzzahlige Vielfache der Wiederholfrequenz  $f_r$  getrennten Frequenzkomponenten lassen sich in ihrer absoluten Frequenzlage nicht durch ganzzahlige Vielfa-

che (n) der Wiederholfrequenz  $f_r$  darstellen, sondern durch die Summe  $(n \cdot f_r + f_0)$  aus  $n \cdot$  Wiederholfrequenz  $f_r$  und einer sogenannten Offset- oder Phasenschlupffrequenz  $f_0$ , die für alle Frequenzkomponenten den gleichen Wert entsprechend dem Quotienten aus der jeweiligen Phasendifferenzen von Puls zu Puls durch die Umlaufzeit  $(2\pi)\tau$  ist. Eine Bestimmung dieser Phasendifferenzen ist bisher nicht verfügbar, so dass die Anwendungen von Pulsasern für Messzwecke oder als Generatoren optischer Frequenzen beschränkt sind.

[0006] In der unveröffentlichten PCT-Anmeldung PCT/EP00/02135 sind Techniken zum stabilisierten Betrieb von Pulsasern beschrieben. Bei diesen ist vorgesehen, neben der Regelung der Wiederholfrequenz auch eine Einstellung der Offsetfrequenz durchzuführen. Zur Einstellung der Offsetfrequenz  $f_0$  wird in den Lichtweg der Resonatoranordnung des Pulsasers eine lineare Dispersion eingeführt, die die Frequenzkomponenten der Laserpulse spektral spezifisch beeinflusst. Die Einführung der linearen Dispersion erfolgt durch eine spektral spezifisch wirksame Änderung der Resonatorlänge in einem Resonatorzweig, den die Lichtpulse nach Kompensation der Gruppengeschwindigkeitsdispersion spektral räumlich getrennt durchlaufen, oder durch andere mechanische (Verkippen einer transparenten Platte, Einschieben eines Prismenpaares oder Einschieben eines Keiles (z. B. 1°-Keil) in den Lichtweg der Resonatoranordnung) oder elektrooptische (Einstellung der wirksamen Pumpleistung zum Pumpen des aktiven Mediums des Pulsasers) Maßnahmen. Die Einstellung der Wiederhol- und der Offsetfrequenz erfolgt in Regelkreisen, die auf dem folgenden Prinzip basieren.

[0007] Eine oder mehrere Frequenzkomponenten des Pulsmodenspektrums werden gleichzeitig mit einer optischen Referenzfrequenz auf einen Detektor gerichtet, in dessen Ausgangssignal ein Schwebungssignal entsprechend der Abweichung zwischen den Frequenzkomponenten und der Referenzfrequenz enthalten ist. Das Schwebungssignal wird als Stellsignal zur Regelung der Wiederhol- oder Offsetfrequenz verwendet. Die Referenzfrequenz wird durch einen stabilisierten Frequenzgenexator erzeugt.

[0008] Die in PCT/EP00/02135 beschriebenen Regelkreise zur Pulsaserstabilisierung besitzen durch die Bereitstellung der Referenzgeneratoren einen relativ komplexen Aufbau. Es besteht ein Interesse, Pulsaser mit einem vereinfachten Aufbau zu stabilisieren, ohne dabei Einschränkungen der Stabilisierungsgenauigkeit hinnehmen zu müssen.

[0009] Aus der Publikation von J. N. Eckstein, A. I. Ferguson und T. W. Hänsch in "Physical Review Letters", Band 40, 1978, Seite 847 ff. ist ein Verfahren zur hochauflösenden 2-Photonen-Spektroskopie mit ps-Laserpulsen bekannt. Die Laserpulse durchlaufen eine Messzelle mit Natriumdampf in zwei entgegengesetzten Richtungen derart, dass beim Zusammentreffen von zwei Lichtpulsen gerade ein 2-Photonen-Übergang angeregt werden kann, dessen Gesamtenergie sich aus zwei Teilbeiträgen zusammensetzt, die gerade zwei sich ergänzenden Frequenzkomponenten im Modenspektrum der Lichtpulse entsprechen. Diese Messtechnik ermöglicht eine hochauflösende Spektroskopie, da die Dopplerverbreiterung der beobachteten Übergänge vermieden wird.

[0010] Es ist die Aufgabe der Erfindung, ein verbessertes Verfahren zur Erzeugung stabilisierter Laser-Lichtpulse anzugeben, das mit einem vereinfachten apparativen Aufbau umsetzbar ist. Die Aufgabe der Erfindung ist es auch, eine verbesserte Lasereinrichtung bereitzustellen, die zur Erzeugung stabilisierter Laserpulse ausgelegt ist und einen einfachen, kompakten und wartungsarmen Aufbau besitzt.

[0011] Diese Aufgaben werden durch ein Verfahren und eine Lasereinrichtung mit den Merkmalen gemäß den Patentansprüchen 1 bzw. 12 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

[0012] Ausgangspunkt der Erfindung ist der Betrieb eines PulsLasers mit zwei Regelkreisen entsprechend den zwei Freiheitsgraden Wiederholfrequenz und Offsetfrequenz des Modenspektrums. In einem Wiederholfrequenz-Regelkreis wird ein erstes Stellsignal zur Einstellung der Wiederholfrequenz erzeugt. Entsprechend dient ein Offsetfrequenz-Regelkreis zur Erzeugung eines zweiten Stellsignals zur Einstellung der Offsetfrequenz. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass mindestens in einem von beiden Regelkreisen das Stellsignal aus dem Ausgangssignal einer Detektoreinrichtung abgeleitet wird, mit ein spektroskopisches Signal (vorzugsweise der Fluoreszenzstrahlung) aus einer Referenzzelle erfassbar ist. In der Referenzzelle wird mit Pulsen des PulsLasers ein schmalbandiger atomarer Übergang optisch angeregt und das spektroskopische Signal induziert, wenn die Laserpulse eine vorbestimmte Wiederholfrequenz und eine vorbestimmte Offsetfrequenz besitzen. Wenn Abweichungen von den vorbestimmten Werten auftreten, wird kein spektroskopisches Signal induziert. Das Ausgangssignal der Detektoreinrichtung ist damit für das Auftreten oder Fehlen des spektroskopischen Signals und damit für die Einstellung der Wiederhol- und Offsetfrequenzen charakteristisch. Der jeweils andere Regelkreis wird durch Vergleich einer Frequenzkomponente der Laserpulse mit einer optischen Referenzfrequenz, die von einer weiteren Frequenzkomponente der Laserpulse abgeleitet ist, oder eines Frequenzabstandes von Frequenzkomponenten der Laserpulse mit einer Mikrowellenreferenzfrequenz und Ableitung eines entsprechenden Stellsignals gebildet.

[0013] Als spektroskopisches Signal wird beispielsweise ein Fluoreszenzsignal, ein Absorptionssignal, Photoionisationssignal (mit einem Photoelektronendetektor erfaßt), oder ein opto-galvanisches oder opto-akustisches Signal verarbeitet.

[0014] Die erfindungsgemäße Stabilisierungstechnik besitzt gegenüber den herkömmlichen Techniken den Vorteil, dass zur Stabilisierung des PulsLasers keine gesonderten Referenzlaser vorgesehen sein müssen. Der Aufbau der erfindungsgemäß stabilisierten Lasereinrichtung wird dadurch erheblich vereinfacht. Es wird eine Integration in ein kompaktes, transportables Lasersystem ermöglicht, das neue Anwendungen in der Spektroskopie, Zeitmesstechnik und Telekommunikation besitzt.

[0015] Gegenstand der Erfindung ist auch eine Lasereinrichtung zur Erzeugung ultrakurzer Laser-Lichtpulse, die mit den Wiederholfrequenz- und Offsetfrequenz-Regelkreisen ausgestattet ist. Entsprechend den oben erläuterten Prinzipien ist mindestens einer der Regelkreise mit der Referenzzelle ausgestattet und zur Einstellung der Wiederholfrequenz oder der Offsetfrequenz in Abhängigkeit von der Erfassung des spektroskopischen Signals von der Referenzzelle eingerichtet.

[0016] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung erfolgt eine Verbreiterung der Laser-Lichtpulse durch Selbstphasenmodulation, vorzugsweise mit einer optischen Faser, derart, dass das Modenspektrum der Laserpulse eine Frequenzoktave überspannt, in der eine niederfrequente Komponente  $f_n$  und eine höherfrequente Komponente entsprechend dem doppelten Wert  $2f_n$  enthalten sind. In diesem Fall erfolgt im jeweiligen Regelkreis eine Phasenkopplung zwischen einer niederfrequenten Frequenzkomponente und einer frequenzhalbierten, höherfrequenten Frequenzkomponente des Modenspektrums (oder umgekehrt).

[0017] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird die Referenzzelle durch eine Referenz-Dampfzelle gebildet, die zur optischen Anregung ohne Dopplerverbreiterung der optischen Übergänge ausgelegt ist (2-Photonen-Spektroskopie, Polarisationspektroskopie, Sättigungsspektroskopie). Dies besitzt den Vorteil, dass die Fluoreszenz extrem schmalbandig angeregt werden kann, so dass durch die Erfassung des Auftretens oder Fehlens der Fluoreszenz ein sensitives Mittel zur Überwachung der Wiederhol- und/oder Offsetfrequenzen gegeben ist.

[0018] Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung werden aus der Beschreibung der beigefügten Zeichnungen ersichtlich. Es zeigen:

[0019] Fig. 1 eine schematische Übersichtsdarstellung einer Lasereinrichtung gemäß einer ersten Ausführungsform der Erfindung, und

[0020] Fig. 2 eine schematische Übersichtsdarstellung einer Lasereinrichtung gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung.

[0021] Die Erfindung wird im Folgenden unter Bezug auf eine Lasereinrichtung mit zwei Regelkreisen beschrieben, die als Wiederholfrequenz- bzw. Offsetfrequenz-Regelkreise bezeichnet werden. Die Erfindung ist nicht auf die hier erläuterte Funktion entsprechend der jeweiligen Benennung beschränkt, sondern kann auch durch Regelung der Offsetfrequenz mit dem Wiederholfrequenz-Regelkreis und umgekehrt implementiert werden. Entscheidend ist lediglich, dass für die zwei Freiheitsgrade der Frequenzkomponenten der Laserpulse zwei Regelkreise vorgesehen sind. Das Prinzip der Einstellung der Wiederhol- und Offsetfrequenzen mit Regelkreisen in Abhängigkeit von Schwebungssignalen aus einer Frequenzkomponente und einer Referenzfrequenz ist an sich in der unveröffentlichten PCT-Anmeldung PCT/EP00/02135 oder bspw. in der Publikation von T. Udem et al. in "Physical Review Letters", Band 82, 1999, Seite 3568 ff. beschrieben. Auf Einzelheiten zum Aufbau der Regelkreise wird daher hier nicht eingegangen.

[0022] Bei den im Folgenden erläuterten Ausführungsformen ist jeweils einer der Regelkreise mit der Referenzzelle und der andere Regelkreis zum Abgleich von Frequenzkomponenten relativ zur Referenzfrequenz ausgelegt. Gemäß einer weiteren (nicht dargestellten) Ausführungsform können auch beide Regelkreise mit getrennten Referenzzellen, die zur Anregung verschiedener optischer Übergänge ausgelegt sind, umgesetzt werden.

[0023] In Fig. 1 ist die Lasereinrichtung 100 zur Erzeugung von stabilisierten Laserpulsen P mit dem PulsLaser 10, dem Wiederholfrequenz-Regelkreis 30 und dem Offset-Regelkreis 20 dargestellt. Der PulsLaser 10 wird bspw. durch einen Titan-Saphier-Laser (z. B. "Coherent Mira 900", Pulslänge 73 fs, Wiederholfrequenz  $f_r = 75$  MHz), einen entsprechenden Ringlaser,  $f_r = 1$  GHz, oder einen diodengepumpten Festkörperlaser (z. B. Chrom-Li-SAF-Laser) gebildet. Der PulsLaser 10 ist vorzugsweise ein kompaktes und transportables, ggf. batteriebetriebenes, Gerät.

[0024] Der PulsLaser 10 ist optional mit einer Einrichtung zur Verbreiterung der Laserpulse durch Selbstphasenmodulation (gestrichelt eingezeichnet, Bezugszeichen 11) verbunden. Die Einrichtung 11 zur Pulsverbreiterung ist z. B. eine optische Einmodenfaser. Die Selbstphasenmodulation wird von K. Imai in "IEEE Journal of Quantum Electronics" Band 34, 1998, Seite 54 ff. beschrieben. Eine besonders starke Verbreiterung des Modenkamms erzielt man bei Verwendung strukturierter optischer Fasern, die einen Faserkern und um diesen axial verlaufende dünne Luftkanäle besitzen (siehe D. Mogilevtsev et al. in "Optics Letters", Band 23, 1998, Seite 1662 ff., T. A. Burks in "Optics Letters", Band 22, 1997, Seite 961 ff. oder T. A. Burks in "IEEE Pho-



tonics Letters", Band 11, 1999, Seite 674 ff.).

[0025] Die vom Puls laser 20, ggf. der Selbstphasenmodulation 11 unterzogenen, Laserpulse A werden im Offsetfrequenz-Regelkreis 20 mit den Strahlteilern bzw. Umlenkspiegeln 22 bis 25 in verschiedene spektrale Anteile B, C aufgeteilt. Hierzu ist mindestens einer der Spiegel 22, 25 zur spektral selektiven Ablenkung von Strahlungsanteilen der Lichtpulse A ausgelegt. Beispielsweise ist vorgesehen, dass der Anteil B höherfrequente Frequenzkomponenten des Modenspektrums und der Anteil C niederfrequente Komponenten des Modenspektrums enthält. Zur Bereitstellung eines ausreichend starken Schwebungssignals an der Detektoreinrichtung 21 werden die Frequenzen der Anteile B und C mit einem Frequenzvervielfacher oder -teiler 26 aneinander angepasst. Beim genannten Beispiel (C: niederfrequenter Anteil) ist das Bauteil 26 ein Frequenzvervielfacher. Das Bauteil 26 ist eine Vervielfacher- oder Teilstufe für optische Frequenzen, wie sie an sich aus dem Stand der Technik bekannt ist.

[0026] Ein besonders einfacher Aufbau ergibt sich, falls im Modenspektrum der Laserpulse eine ganze Frequenzoktave überspannt wird. In diesem Fall ist das Bauteil 26 ein optisch nichtlinearer Kristall zur Frequenzverdoppelung (oder -halbierung). Nach Durchlauf der Frequenzvervielfachung (Bauteil 26) liegt ein frequenzverschobener Strahlungsanteil D vor. Die Strahlungsanteile B und D werden gleichzeitig auf die Detektoreinrichtung 21 gerichtet. Bei gleichzeitigem Einfall der Strahlungsanteile wird an der Detektoreinrichtung 21 entsprechend der Frequenzabweichung der Frequenzkomponente(n) der Strahlungsanteile B, D ein elektrisches Ausgangssignal erzeugt, das Frequenzanteile mit einer bestimmten Schwebungsfrequenz enthält. Das Ausgangssignal wird an den ersten Regelverstärker 27 gegeben, mit dem eine (an sich bekannte) Einrichtung zur Einstellung der Offsetfrequenz des Puls lasers 10 betätigt wird. Diese (nicht dargestellte) Einrichtung wird so betätigt, dass das Schwebungssignal Null wird oder eine vorbestimmte Bezugsfrequenz besitzt. Die Einrichtung zur Einstellung der Offsetfrequenz kann durch die o. g. Maßnahmen realisiert werden, die in der PCT-Anmeldung PCT/EP00/02135 beschrieben sind.

[0027] Gemäß einer abgewandelten Ausführungsform kann auch der Anteil B niederfrequente Frequenzkomponenten und der Anteil C höherfrequente Frequenzkomponenten enthalten, wobei das Bauteil 26 dann zur Frequenzteilung ausgelegt ist. Alternativ kann auch die Einrichtung zur Frequenzvervielfachung oder -teilung im jeweils anderen Zweig des Strahlteilers 22 bis 25 vorgesehen sein. Gemäß einer weiteren Abwandlung können die Spiegel 22 bis 25 auch durch andere, gleichwirkende Strahlteiler (z. B. Prismen) ersetzt werden. Zusätzlich können im dargestellten Strahlengang der Anteile B, C und D optische Filter und ggf. eine Zeitverzögerungsstrecke zur Anpassung des zeitlichen Einlaufens der Strahlungsanteile bei der Detektoreinrichtung 21 vorgesehen sein.

[0028] Die Detektoreinrichtung 21 ist ein lichtempfindliches Element, wie z. B. eine Photodiode oder ein Photomultiplier. Der Detektoreinrichtung können weitere Einrichtungen zur Signalformung nachgeordnet sein. Eine Signalformung kann bspw. eine Filterung der Ausgangssignale und/oder eine Verstärkung umfassen.

[0029] Ein weiterer Strahlungsanteil E der, ggf. selbstphasenmodulierten, Laserpulse wird zum Wiederhol frequenz-Regelkreis 30 übertragen. Am Strahlteiler 32 wird der Strahlungsanteil G, der der Spektralzusammensetzung der Laserpulse entspricht, einerseits als Folge von stabilisierten Ausgangspulsen P bereitgestellt und andererseits auf die Referenz zelle 33 gerichtet.

[0030] Als Referenz zelle 33 ist allgemeine jede Zelle oder Probenkammer verwendbar, die eine Substanz enthält, die bei optischer Anregung ein spektroskopisches Signal entsprechend mindestens einer Frequenzkomponente des Strahlungsanteils G zeigt. Das Anregungsspektrum kann zur Erzielung der gewünschten Regelstabilität eine extreme Schmalbandigkeit zeigen. Daher wird die Referenz zelle 33 vorzugsweise in der dargestellten Ausführungsform als Referenz-Dampfzelle implementiert, die zur dopplerrfreien optischen Anregung (z. B. 2-Photonen-Spektroskopie, Polarisations spektroskopie, Sättigungsspektroskopie) ausgelegt ist.

[0031] Die Referenz-Dampfzelle 33 ist eine temperierbare Dampfzelle, die bei Betrieb den Dampf einer geeignet fluo-reszierenden Substanz (z. B. Jod, Rubidium, Natrium oder dergleichen) enthält. Durch Einstellung der Zellentemperatur ergibt sich in der Referenz zelle ein definierter Dampfdruck der die Lage und Breite der atomaren Übergänge festlegt. Der Strahlungsanteil G der Laserpulse tritt in einer ersten Bezugsrichtung (Pfeilrichtung) durch die Referenz-Dampfzelle hindurch, und trifft auf der Rückseite auf einen ebenen Spiegel 34, der die durchtretenden Pulse in entgegengesetzter Richtung (Doppelpfeil) rückreflektiert. Der Abstand des Spiegels 34 von der Mitte der Referenz-Dampfzelle 33 ist so eingestellt, dass sich die Laserpulse in der Zelle konstruktiv überlagern. Wie von J. N. Eckstein et al. (siehe oben) beschrieben, liefern die sich ergänzenden Frequenzkomponenten im Modenspektrum der Laserpulse gerade die Energiebeiträge z. B. zur optischen 2-Photonen-Anregung. Es werden nur die Dampf atome oder Moleküle angeregt, die sich in Bezug auf die Ausbreitungsrichtung der Laserpulse nicht bewegen. Dadurch wird eine Dopplerverbreiterung vermieden. Die im Dampf angeregte Fluoreszenz wird als spektroskopisches Signal auf die Detektoreinrichtung 31 gelenkt.

[0032] An der Detektoreinrichtung 31 wird ein Ausgangssignal entsprechend der Fluoreszenz der Referenz-Dampfzelle 33 erzeugt und als elektrisches Ausgangssignal, ggf. gefiltert und/oder zwischenverstärkt, an den Regelverstärker 35 gegeben, mit dem eine Einrichtung zur Einstellung der Wiederhol frequenz im Puls laser 10 betätigt wird. Diese (nicht dargestellte) Einrichtung umfasst bspw. eine Einrichtung zur Änderung der Resonatorlänge des Puls lasers 10. Bei einer Verstärkung der Resonatorlänge ändert sich entsprechend auch die Wiederhol frequenz. Die Wiederhol frequenz des Puls lasers 10 wird solange verstellt, bis mit der Detektoreinrichtung 31 ein Fluoreszenzsignal von der Referenz-Dampfzelle 33 erfasst wird.

[0033] Anstelle der geschlossenen Referenz-Dampfzelle 33 kann auch eine offene Zelle mit einem Atomstrahl als System zur schmalbandigen optischen Anregung verwendet werden.

[0034] In Fig. 2 ist eine abgewandelte Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Lasereinrichtung illustriert, die wiederum einen Offsetfrequenz-Regelkreis 50 und einen Wiederhol frequenz-Regelkreis 40 enthält. Der Offsetfrequenz-Regelkreis 50 funktioniert analog zum oben erläuterten Wiederhol frequenz-Regelkreis 30, wobei hier mit dem Ausgangssignal der Detektoreinrichtung 51 und dem Regelverstärker 55 die Offsetfrequenz des Puls lasers 10 je nach Vorliegen der Fehlen der Fluoreszenz von der Zelle 53 geregelt wird.

[0035] Der Wiederhol frequenz-Regelkreis 40 basiert auf der Phasenkopplung eines Frequenzabstandes aus dem Modenspektrum der Laserpulse mit einer von einem Mikrowellengenerator gelieferten Referenzfrequenz im Radiofrequenzbereich. Von den Laserpulsen A wird ein Strahlungsanteil B in den Wiederhol frequenz-Regelkreis 40 ausgekop-



pelt und auf die Detektoreinrichtung 42 gerichtet. Das Ausgangssignal C der Detektoreinrichtung 42 ist ein Radiofrequenzsignal mit Frequenzanteilen entsprechend den im Modenspektrum der Laserpulse auftretenden Frequenzabstände. Das Ausgangssignal C wird an eine elektrische Mischereinrichtung 43 gegeben, die gleichzeitig die Mikrowellen-Referenzfrequenz vom Mikrowellengenerator 44 erhält. Die additive Überlagerung beider Signale liefert ein Schwebungssignal, das als Stellsignal über den Regelverstärker 45 zur Einstellung der Wiederholfrequenz des Puls lasers 10 verwendet wird.

[0036] Die erfindungsgemäße Lasereinrichtung ist mit Vorteil in der Telekommunikation, Spektroskopie und Zeitmesstechnik analog zu den Anwendungen einsetzbar, die in der PCT-Anmeldung PCT/EP00/02135 beschrieben sind.

[0037] Die in der vorstehenden Beschreibung, der Zeichnung und den Ansprüchen offenbarten Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch in beliebiger Kombination für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausgestaltungen von Bedeutung sein.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Betrieb eines Puls lasers (10), der zur Erzeugung von Laserpulsen mit einer Wiederholfrequenz ( $f_R$ ) eingerichtet ist, die ein Spektrum aus N Frequenzkomponenten  $f_n$  mit  $f_n = n \cdot f_R + f_0$  ( $n = 1, \dots, N$ ) enthalten, wobei ( $f_0$ ) eine Offsetfrequenz darstellt, bei dem mit einem Wiederholfrequenz-Regelkreis ein erstes Stellsignal zur Einstellung der Wiederholfrequenz und mit einem Offsetfrequenz-Regelkreis ein zweites Stellsignal zur Einstellung der Offsetfrequenz erzeugt wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Laserpulse auf eine Referenzzelle (33, 53) gerichtet werden, in der bei Einstellung einer vorbestimmten Wiederholfrequenz und einer vorbestimmten Offsetfrequenz ein atomarer Übergang optisch angeregt und ein spektroskopisches Signal induziert werden kann, das mit einer ersten Detektoreinrichtung (31, 51) erfassbar ist, mit der ein für das Auftreten oder Fehlen des spektroskopischen Signals charakteristisches Ausgangssignal erzeugt wird, das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) zur Erzeugung entweder des ersten oder des zweiten Stellsignals verwendet wird, und die Wiederholfrequenz oder die Offsetfrequenz des Puls lasers (10) so eingestellt werden, dass das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) das Auftreten des spektroskopischen Signals anzeigt.
2. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) zur Erzeugung des ersten Stellsignals im Wiederholfrequenz-Regelkreis verwendet wird und im Offsetfrequenz-Regelkreis die Erzeugung des zweiten Stellsignals zur Einstellung der Offsetfrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung einer ersten Frequenzkomponente ( $f_{n,1}$ ) der Laserpulse von einer optischen Referenzfrequenz ( $f_{ref,opt}$ ) oder in Abhängigkeit von der Abweichung eines Abstandes von Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}, f_{n,2}$ ) der Laserpulse von einer Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{ref,mf}$ ) erfolgt.
3. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) zur Erzeugung des zweiten Stellsignals im Offsetfrequenz-Regelkreis verwendet wird und im Wiederholfrequenz-Regelkreis die Erzeugung des ersten Stellsignals zur Einstellung der Wiederholfrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung einer ersten Frequenzkompo-

nente ( $f_{n,1}$ ) der Laserpulse von einer optischen Referenzfrequenz ( $f_{ref,opt}$ ) oder in Abhängigkeit von der Abweichung eines Abstandes von Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}, f_{n,2}$ ) der Laserpulse von einer Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{ref,mf}$ ) erfolgt.

4. Verfahren gemäß Anspruch 2 oder 3, bei dem zur Erzeugung des ersten oder zweiten Stellsignals in Abhängigkeit von der Abweichung einer ersten Frequenzkomponente ( $f_{n,1}$ ) der Laserpulse von einer optischen Referenzfrequenz eine weitere Frequenzkomponenten ( $f_{n,3}$ ) der Laserpulse zur Anpassung an die erste Frequenzkomponente ( $f_{n,1}$ ) einer Frequenzvervielfachung oder -teilung unterzogen und gleichzeitig mit der ersten Frequenzkomponente auf eine zweite Detektoreinrichtung (21) gerichtet wird, deren Ausgangssignal entsprechend als erstes oder zweites Stellsignal verwendet wird.

5. Verfahren gemäß Anspruch 2 oder 3, bei dem zur Erzeugung des ersten oder zweiten Stellsignals in Abhängigkeit von der Abweichung eines Abstandes von Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}, f_{n,2}$ ) der Laserpulse von einer Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{ref,mf}$ ) die Laserpulse auf eine dritte Detektoreinrichtung (42) gerichtet werden, deren Ausgangssignal eine Schwebungsfrequenz entsprechend dem Abstand der Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}, f_{n,2}$ ) enthält, und das Ausgangssignal der dritten Detektoreinrichtung (42) an einer Mischeinrichtung (43) mit der Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{ref,mf}$ ) von einem Mikrowellengenerator (44) gemischt wird, wobei das Mischsignal der Mischeinrichtung (43) entsprechend als erstes oder zweites Stellsignal verwendet wird.

6. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem eine Verbreiterung des Spektrums der Frequenzkomponenten der Lichtpulse durch Selbstphasenmodulation erfolgt.

7. Verfahren gemäß Anspruch 6, bei dem die Selbstphasenmodulation erzeugt wird, indem die Laserpulse eine optische Faser (11) durchlaufen.

8. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche 2 bis 7, bei dem zur Erzeugung der optischen Referenzfrequenz die Laserpulse einer Frequenzverdopplung oder -halbierung unterzogen werden.

9. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem als Referenzzelle eine temperierbare Referenz-Dampfzelle (33, 53) oder eine Zelle mit einem freien Atomstrahl verwendet wird.

10. Verfahren gemäß Anspruch 9, bei dem in der Referenz-Dampfzelle (36) eine dopplerfreie Anregung erfolgt, die jeweils durch zwei entgegengesetzt durch die Referenz-Dampfzelle (36) laufende Laserpulse ausgelöst wird.

11. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem als spektroskopisches Signal eine Fluoreszenzemission, eine Absorptionsänderung, ein Photoionisationssignal oder ein galvano- oder akustooptisches Signal induziert wird.

12. Lasereinrichtung zur Erzeugung von Laserpulsen mit einer Wiederholfrequenz ( $f_R$ ), die ein Spektrum aus N Frequenzkomponenten ( $f_n$ ) mit  $f_n = n \cdot f_R + f_0$  ( $n = 1, \dots, N$ ) enthalten, wobei ( $f_0$ ) eine Offsetfrequenz darstellt, mit einem Puls laser (10), einem Wiederholfrequenz-Regelkreis zur Einstellung der Wiederholfrequenz des Puls lasers (10) und einem Offsetfrequenz-Regelkreis zur Einstellung der Offsetfrequenz, dadurch gekennzeichnet, dass eine Referenzzelle (33, 53) und eine erste Detektoreinrichtung (31, 51) vorgesehen sind, wobei in der Referenz-

renzzelle (33, 53) bei Einstellung einer vorbestimmten Wiederholffrequenz und einer Vorbestimmten Offsetfrequenz mit den Laserpulsen ein atomarer Übergang optisch angeregt und ein spektroskopisches Signal induziert werden kann, das mit der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) erfassbar ist, die dazu eingerichtet ist, ein für das Auftreten oder Fehlen des spektroskopischen Signals charakteristisches Ausgangssignal zu erzeugen, das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) entweder das erste oder das zweite Stellsignal entsprechend entweder im Wiederholffrequenz-Regelkreis oder im Offsetfrequenz-Regelkreis bildet, und eine Einrichtung zur Einstellung der Wiederholffrequenz oder der Offsetfrequenz des Pulsasers (10) vorgesehen ist, mit der die Wiederholffrequenz oder die Offsetfrequenz so einstellbar sind, dass das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) das Auftreten des spektroskopischen Signals anzeigt.

13. Lasereinrichtung gemäß Anspruch 12, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) das erste Stellsignal im Wiederholffrequenz-Regelkreis bildet und im Offsetfrequenz-Regelkreis eine Strahlteileranordnung (22-25), eine Frequenzvervielfacher- oder -teilereinrichtung (26), eine zweite Detektoreinrichtung (21) und ein Regelverstärker (27) vorgesehen sind, der mit einer Einrichtung zur Einstellung der Offsetfrequenz des Pulsasers (10) verbunden ist, wobei der Offsetfrequenz-Regelkreis (20) zur Erzeugung des zweiten Stellsignal zur Einstellung der Offsetfrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung einer ersten Frequenzkomponente ( $f_{n,1}$ ) der Laserpulse von einer mit der Strahlteileranordnung (22-25) und der Frequenzvervielfacher- oder -teilereinrichtung (26) erzeugten optischen Referenzfrequenz ( $f_{ref,opt}$ ) eingerichtet ist.

14. Lasereinrichtung gemäß Anspruch 12, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) das erste Stellsignal im Wiederholffrequenz-Regelkreis bildet und im Offsetfrequenz-Regelkreis eine dritte Detektoreinrichtung (42) zur Erzeugung eines Ausgangssignals mit einer Schwebungsfrequenz entsprechend dem Abstand der Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$ ), eine Mischereinrichtung (43) zur Mischung der von einem Mikrowellengenerator (44) gelieferten Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{ref,rf}$ ) und ein Regelverstärker (27) vorgesehen sind, der mit einer Einrichtung zur Einstellung der Offsetfrequenz des Pulsasers (10) verbunden ist, wobei der Offsetfrequenz-Regelkreis (20) zur Erzeugung des zweiten Stellsignal zur Einstellung der Offsetfrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung vom Abstand der Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$ ) von der Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{ref,rf}$ ) eingerichtet ist.

15. Lasereinrichtung gemäß Anspruch 12, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) das zweite Stellsignal im Offsetfrequenz-Regelkreis bildet und im Wiederholffrequenz-Regelkreis eine Strahlteileranordnung (22-25), eine Frequenzvervielfacher- oder -teilereinrichtung (26), eine zweite Detektoreinrichtung (21) und ein Regelverstärker (27) vorgesehen sind, der mit einer Einrichtung zur Einstellung der Wiederholffrequenz des Pulsasers (10) verbunden ist, wobei der Wiederholffrequenz-Regelkreis (20) zur Erzeugung des ersten Stellsignals zur Einstellung der Wiederholffrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung einer ersten Frequenzkomponente ( $f_{n,1}$ ) der Laserpulse von einer mit der Strahlteileranordnung (22-

25) und der Frequenzvervielfacher- oder -teilereinrichtung (26) erzeugten optischen Referenzfrequenz ( $f_{ref,opt}$ ) eingerichtet ist.

16. Lasereinrichtung gemäß Anspruch 12, bei dem das Ausgangssignal der ersten Detektoreinrichtung (31, 51) das zweite Stellsignal im Offsetfrequenz-Regelkreis bildet und im Wiederholffrequenz-Regelkreis eine dritte Detektoreinrichtung (42) zur Erzeugung eines Ausgangssignals mit einer Schwebungsfrequenz entsprechend dem Abstand der Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$ ), eine Mischereinrichtung (43) zur Mischung der von einem Mikrowellengenerator (44) gelieferten Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{ref,rf}$ ) und ein Regelverstärker (27) vorgesehen sind, der mit einer Einrichtung zur Einstellung der Wiederholffrequenz des Pulsasers (10) verbunden ist, wobei der Wiederholffrequenz-Regelkreis (20) zur Erzeugung des ersten Stellsignals zur Einstellung der Wiederholffrequenz in Abhängigkeit von der Abweichung vom Abstand der Frequenzkomponenten ( $f_{n,1}$ ,  $f_{n,2}$ ) von der Mikrowellen-Referenzfrequenz ( $f_{ref,rf}$ ) eingerichtet ist.

17. Lasereinrichtung gemäß einem der Ansprüche 12 bis 16, bei der eine Einrichtung (11) zur Selbstphasenmodulation der Laserpulse vorgesehen ist.

18. Lasereinrichtung gemäß Anspruch 17, bei der die Einrichtung zur Selbstphasenmodulation durch eine optische Faser (11) gebildet wird.

19. Lasereinrichtung gemäß einem der Ansprüche 12 bis 18, bei der die Referenzzelle eine Referenz-Dampfzelle (36) ist, die zur dopplerverfreien Anregung ausgelegt ist.

20. Lasereinrichtung gemäß einem der Ansprüche 12 bis 19, bei der die Referenzzelle eine Referenz-Dampfzelle (36) ist, die zur Anregung des spektroskopischen Signals als Fluoreszenzemission, Absorptionsänderung, Photoionisationssignal oder galvano- oder akustooptisches Signal ausgelegt ist.

---

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

---

---

- Leerseite -

